УДК 622.831.232

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ОБРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТКИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов

ГОУ ВПО "Сибирский государственный индустриальный университет". г. Новокузнецк
E-mail: rector@sibsiu.ru, ks@itm.nkz.ru

На основе метода конечных элементов разработана пространственная модель деформирования и разрушения горных пород для прогноза изменения напряженно-деформированного состояния углепородного массива и его прочностных свойств в процессе отработки угольного пласта. Механизм обрушения пород кровли моделируется в процессе пошагового движения очистного забоя, с учетом влияния функции времени, анализа напряженного состояния в массиве горных пород, последовательного накопления повреждений в породах для конечных элементов и обрушения тех из них, в которых накопленные повреждения превысили критическое значение.

Интенсификация процессов выемки угля в очистных забоях существенно влияет на геомеханическую ситуацию, связанную с напряженно-деформированным состоянием (НДС) пород в окрестности забоев. При этом важную роль в обосновании параметров управления горным давлением имеет механизм формирования предельного напряженного состояния в области интенсивного разрушения пород при сдвижении кровли, а также создание математических моделей, позволяющих прогнозировать изменение состояния углепородного массива при проведении горной выработки.

Поскольку горные породы в процессе их деформирования проявляют упругие, пластические и хрупкие свойства практически одновременно, то, естественно, нельзя построить их математическое описание на базе только одной из известных моделей.

Для прогноза проявлений горного давления на основе оценки НДС массива горных пород методами механики сплошных сред математическая модель массива описывается тремя известными группами уравнений: статическими уравнениями равновесия, кинематическими уравнениями совместности и непрерывности деформаций и физическими уравнениями, связывающими компоненты тензоров напряжений и деформаций [1].

Решение уравнений осуществляется методом конечных элементов, который сводит задачу к решению системы алгебраических уравнений путем минимизации функционала полной потенциальной энергии среды.

Кроме того, для методов, учитывающих возникновение вблизи выработки зоны разрушения, требуются реологические и прочностные характеристики горных пород, включая характеристики, определяющие закономерности деформирования пород в допредельном и запредельном состоянии.

Разработка реологической модели для учета изменения свойств угольного массива во времени. Для учета изменения свойств угольного массива во времени используется реологическая модель, которая отражает свойство ползучести горных пород и характеризуется определенной зависимостью деформации в какой-либо момент времени от всей предыдущей истории нагружения.

Согласно теории Ж.С. Ержанова, для описания поведения различных видов пород, свойства которых во времени не изменяются, можно использовать разностное ядро типа Абеля. Если в момент времени t к телу приложено напряжение $\sigma(\tau)$, действующее в течение времени $d\tau$, то при использовании ядра ползучести типа Абеля [2]

$$L(t-\tau) = \delta(t-\tau)^{-\alpha},$$

закон деформирования образца горной породы при длительно действующей постоянной нагрузке имеет вид [2]

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E}\left(1+\frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}\right),$$

где $\varepsilon(t)$ – деформация в момент времени t; E – модуль деформации; δ и $\alpha(0<\alpha<1)$ – характеристики ползучести, получаемые экспериментально.

Параметр ползучести, характеризующий реологические свойства угля, пород кровли и почвы, определяется в зависимости от литологического типа породы по корреляционным формулам [3]:

$$\delta = \begin{cases} 0,102-0,17\cdot10^{-5}E, & \textit{для песчанника};\\ 0,20-0,42\cdot10^{-5}E, & \textit{для алевролита},\\ 3,38-0,88\cdot10^{-5}E, & \textit{для аргиллита},\\ 0,14-2,1\cdot10^{-5}E, & \textit{для угля}, \end{cases}$$

где E – модуль деформации породы.

Коэффициент α, учитывающий трещиноватость угольного массива, также определяется экспериментально в зависимости от коэффициента крепости и расстояния между трещинами (α=0,4...0,8).

В задачах механики подземных сооружений, в которых граничные условия и объемные силы принимаются не зависящими от времени, Б.З. Амусин и А.М. Линьков предложили использовать метод переменных модулей [4].

Согласно этому методу влияние времени учитывается путем замены деформационных характеристик массива временными функциями. В частности, модуль деформации пород E можно представить как некоторую функцию времени E_t [4]

$$E_t = \frac{E}{1+\varphi(t)},$$

где $\varphi(t)$ – функция ползучести горных пород, учитывающая изменение свойств угольного массива во времени

$$\varphi(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}.$$

Временные функции для коэффициента Пуассона и модуля сдвига имеют вид [4]:

$$\nu_t = 0,5 - \frac{0,5-\nu}{1-\varphi(t)}; \quad G_t = G\frac{2(1+\nu)}{1+3\varphi(t)}.$$

Следует отметить, что метод переменных модулей предполагает замену деформационных характеристик временными функциями для всего угольного массива, однако изменение свойств во времени необходимо учитывать только в зоне влияния горной выработки.

Поэтому в данной работе для того, чтобы учитывать функции времени только в зоне влияния выработки вычисляется коэффициент концентрации упругих напряжений по формуле

$$k_b = \left| \frac{\tau_{oct} - \tau_{oct}^0}{\tau_{oct}^0} \right|,$$

где τ_{oct} – октаэдрические касательные напряжения в массиве, вмещающем горную выработку, вычисленные через компоненты нормальных напряжений $\{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}\}$ [1];

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+(\sigma_y-\sigma_z)^2+(\sigma_z-\sigma_x)^2+6(\tau_{xy}^2+\tau_{yz}^2+\tau_{zx}^2)}, \quad (1)$$

τ^0_{oct} – октаэдрические касательные напряжения в нетронутом массиве, вычисленные через компоненты нормальных напряжений $\{\sigma_x^0 \sigma_y^0 \sigma_z^0 \tau_{xy}^0 \tau_{yz}^0 \tau_{zx}^0\}$ по формуле (1).

Тогда функция ползучести с учетом коэффициента концентрации напряжений в зоне влияния горной выработки определяется следующим образом

$$\varphi_t^b = \varphi_t k_b. \quad (2)$$

Использование формулы (2) позволяет изменять модуль деформации (E) угля и пород в каждом конечном элементе в зависимости от степени влияния на него выработанного пространства по формуле

$$E_t = \frac{E}{\varphi_t^b}. \quad (3)$$

Таким образом, изменение свойств угля и пород позволяет учесть влияние функции времени при вычислении нелинейных параметров НДС массива горных пород и определении границ зоны блочного обрушения горных пород.

Выбор критерия прочности для прогноза характера разрушения горных пород. Критерии разрушения не следуют из уравнений равновесия и движения, они являются дополнительными условиями при решении задач о предельном равновесии.

Прогноз несущей способности материала можно выполнить с помощью критериев локального разрушения или макроразрушения. Однако в реальных материалах и горных породах вследствие микропластических деформаций локальные пики напряжений перераспределяются и не влекут за собой разрушения тела. При разрушении в полях сжимающих напряжений даже бурное развитие одной или нескольких трещин не ведет к катастрофической потере несущей способности. В таких условиях более работоспособными оказываются критерии макроразрушения, описывающие потерю несущей способности некоторого объема материала.

При моделировании механизма разрушения угля и пород в окрестности горной выработки для определения предельных напряжений применяется обобщенный критерий Кулона-Мизеса [5], в котором условие разрушения в пространстве главных напряжений интерпретируется поверхностью вращения в виде усеченного конуса:

$$\begin{cases} \tau_{oct} = (C\text{ctg}\varphi + \sigma_{oct})\text{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta+\gamma}{2}\right); \\ \sigma_{oct} = \sigma_p; \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\text{tg}\beta = \frac{\sqrt{2}C\text{ctg}\varphi}{\sigma + C\text{ctg}\varphi}; \quad \text{tg}\gamma = \frac{C\text{ctg}\varphi}{\sqrt{2}(\sigma_c + C\text{ctg}\varphi)},$$

σ_{oct}, τ_{oct} – нормальное и касательное октаэдрические напряжения; σ_p – прочность на растяжение ($\sigma_p<0$); C – сцепление; φ – угол внутреннего трения.

На основе анализа пространственного НДС с использованием критерия Кулона-Мизеса определяется коэффициент остаточной прочности угля или породы ($k_p \le 1$) в каждом конечном элементе:

$$k_p = \begin{cases} \frac{\tau_{oct}^{pred}}{\tau_{oct}}, & \sigma_{oct} \le \sigma_p \\ \frac{\sigma_{oct}^{pred}}{\sigma_{oct}}, & \sigma_{oct} > \sigma_p \end{cases}, \quad (5)$$

где $\tau_{oct}^{пред}$ и $\sigma_{oct}^{пред}$ – предельные октаэдрические напряжения, вычисленные по критерию Кулона-Мизеса.

Границы блоков обрушения подработанных пород кровли выделяются по коэффициенту остаточной прочности: значения $k_p \le 1$ определяют зону блочного обрушения угля и пород.

Моделирование механизма обрушения горных пород с последовательным накоплением повреждений. Экспериментальными методами исследования установлено, что в зависимости от горно-геологических условий смещение пород кровли в окрестности горных выработок происходит в виде расслоения и последующего послойного сдвижения, ступенчатого опускания блоков по пересекающим слои трещинам, а также плавного опускания без видимых разрывов сплошности. При этом система релаксирует в два основных этапа: накопления микроскопических повреждений и магистрального макроскопического разрушения [6].

Второй этап наступает при достижении некоторого интегрального предела микроразрушений, зависящего от параметров НДС и свойств горных пород. Поэтому для моделирования процесса обруше-

ния пород кровли при движении очистного забоя необходимо использовать механизм последовательного накопления микроскопических повреждений и определения критического значения предела дезинтеграции горных пород, позволяющего выделить границу зоны обрушившихся пород.

Механизм обрушения моделируется в процессе пошагового движения очистного забоя, с учетом влияния функции времени и изменения модуля деформации угля и пород в каждом конечном элементе в зависимости от степени влияния на него выработанного пространства по формуле (3), анализа изменений НДС в массиве горных пород по формулам (4, 5), последовательного накопления повреждений в породах для конечных элементов и обрушения тех из них, в которых накопленные повреждения превысили критическое значение.

Процесс обрушения пород кровли носит циклический характер: можно выделить первичный цикл и циклы вторичных осадок. При ограниченных размерах области исследования цикличность процесса обрушения имитируется пошаговым продвижением очистного забоя до первичного обрушения пород основной кровли и последующим обрушением при вторичных осадках кровли посредством перехода к новой системе координат путем параллельного сдвига по оси OX на границу разрушенных пород при первичном обрушении.

На основе разработанного алгоритма проведено прогнозирование параметров разрушения пород

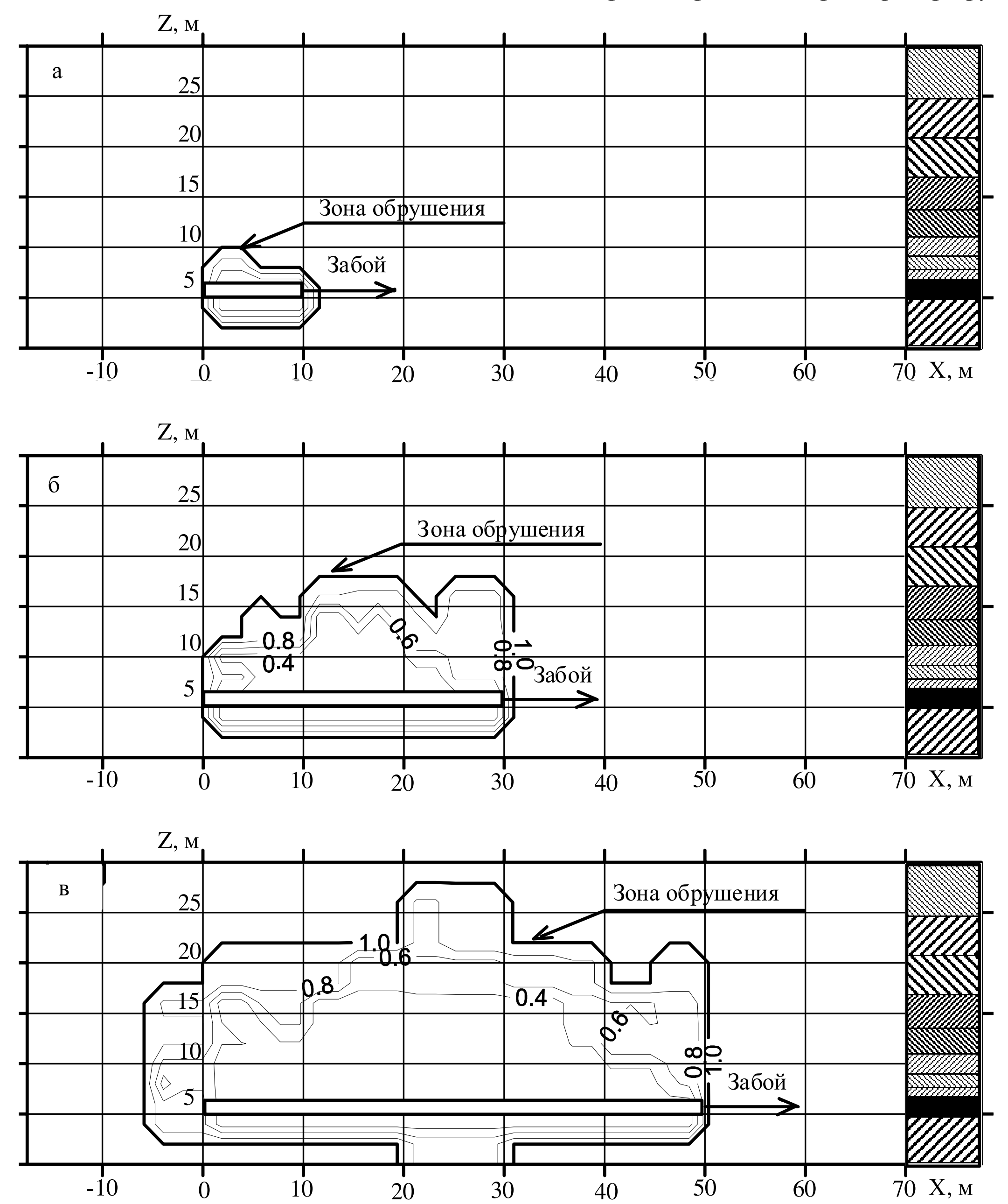


Рис. 1. *Изолинии коэффициента остаточной прочности пород при движении очистного забоя от монтажной камеры на: а) 10 м; б) 30 м; в) 50 м*

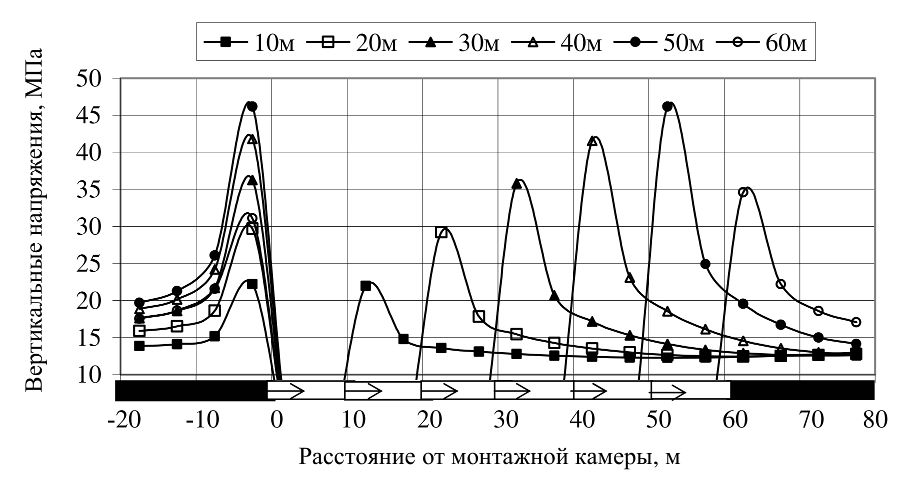


Рис. 2. *Эпюры опорного давления для угольного пласта с учетом функции времени и движения очистного забоя*

непосредственной кровли в процессе пошагового движения забоя по пласту 26[а] при отработке свиты угольных пластов в условиях ОАО "Шахта "Есаульская". Порядок отработки пластов нисходящий, верхний пласт 29[а] отработан, поэтому породы выше отработанного пласта рассматриваются как сыпучий материал в виде пригрузки. Свойства пород между отработанным верхним пластом 29[а] и отрабатываемым нижним пластом 26[а] приняты согласно геологическим отчетам.

Как показано на рис. 1, *в* виде изолиний коэффициента остаточной прочности пород кровли, блоки пород, расположенные непосредственно над выработанным пространством в слоях подработанной толщи, обрушаются, образуя свод уступной формы. Значение коэффициента остаточной прочности равное единице (k_p=1) определяет границу зоны обрушенных пород. Суммарная мощность обрушившихся слоев пород достигает 10 м при отработке угольного пласта 26[а] мощностью 2 м. Расчетная высота зоны обрушения соответствует фактической высоте, равной от 3-х до 5-ти мощностей вынимаемого пласта. Угол обрушения пород в выработанном пространстве составляет 50...90°. По мере подвигания забоя лавы в движение приходят новые участки подработанной толщи. Увеличение площади выработанного пространства приводит к изменению НДС и пластических свойств пород, что способствует увеличению области сдвижения и формированию зоны дезинтеграции (рис. 1, *а, б, в*).

Следует отметить, что характер развития процесса разрушения оказывает существенное влияние на распределение напряжений вблизи выработок, на параметры опорного горного давления, неупругих деформаций и величины смещений, а также на пучение и разрушение пород почвы и кровли. До первичного обрушения пород непосредственной кровли на границе угольного массива всегда четко выражена область повышенных напряжений (рис. 2). После первичного обрушения пород кровли напряжения в угольном массиве снижаются на 30...40 %.

Полученные результаты моделирования по характеру процесса разрушения горных пород и величине максимальных напряжений качественно соответствуют данным натурных наблюдений по распределению напряжений в угольном массиве, приведенным в работах [7, 8].

Таким образом, разработанная пространственная модель деформирования и разрушения горных пород позволяет на основе расчета методом конечных элементов параметров НДС углепородного массива, использования обобщенного критерия прочности и временных функций адекватно описывать механизм обрушения пород кровли при движении очистного забоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.
2. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и ее приложения. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 173 с.
3. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов и др. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
4. Амусин Б.З., Линьков А.М. Об использовании переменных модулей для решения одного класса задач линейной наследственной ползучести // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1974. – № 6. – С. 162–166.
5. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев и др. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
6. Зборщик М.П., Метлов Л.С., Морозов А.Ф. Механизм зонального разрушения горных пород вокруг технологических выработок // 8 Всеросс. съезд по теоретической и прикладной механике. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – С. 272–273.
7. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 295 с.
8. Сдвижение горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР / ВНИМИ; Под ред. М.В. Короткова. – М.: Углетехиздат, 1958. – 250 с.